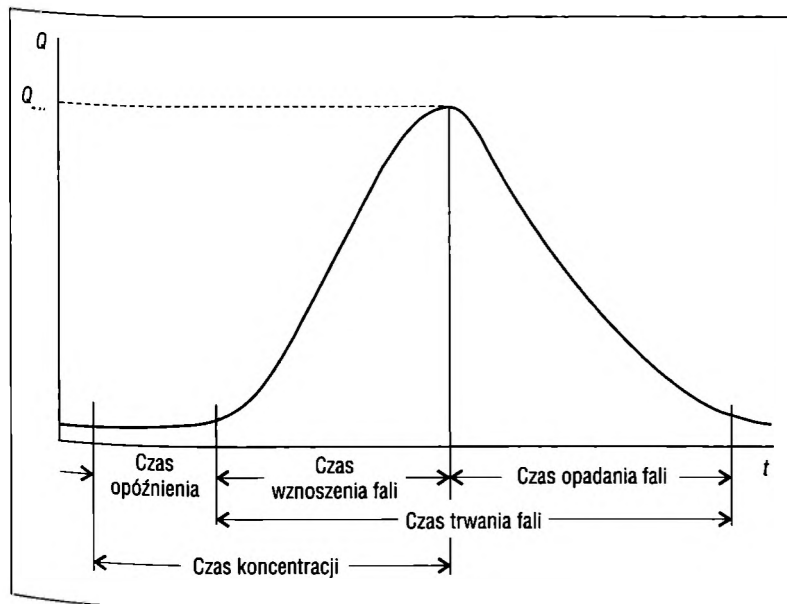


4.8. GEOMORFOKLIMATYCZNY MODEL ODPLYWU

W ostatnim czasie wzrasta zapotrzebowanie na studia i badania małych zlewni w związku z projektowaniem urządzeń hydrotechnicznych lub prognozowaniem zmian stosunków wodnych pod wpływem zmian zagospodarowania. Istnieje zatem konieczność poznania wielkości i dynamiki odpływu. W wielu przypadkach małe zlewnie nie posiadają wodowskazów; są to tzw. zlewnie niekontrolowane. W takich przypadkach wykorzystuje się modele odpływu sformułowane na podstawie badań przeprowadzonych w zlewniach kontrolowanych. Ideą tych modeli jest znalezienie zależności między wybraną charakterystyką odpływu a parametrami wpływającymi na jego wielkość i dynamikę – łatwo mierzalnymi w terenie lub możliwymi do określenia na podstawie mapy. W większości przypadków, zagadnienie sprowadza się do modelowania odpływu powierzchniowego w okresie występowania dużych opadów.

Pojedynczą **falę wezbraniową**, tj. falę posiadającą jedną kulminację przepływu, można scharakteryzować następującymi wielkościami (ryc. 4.8.1):



model – dowolna forma reprezentacji obiektu, procesu lub systemu; w hydrologii stosuje się najczęściej modele matematyczne do opisu obiegu wody w zlewni

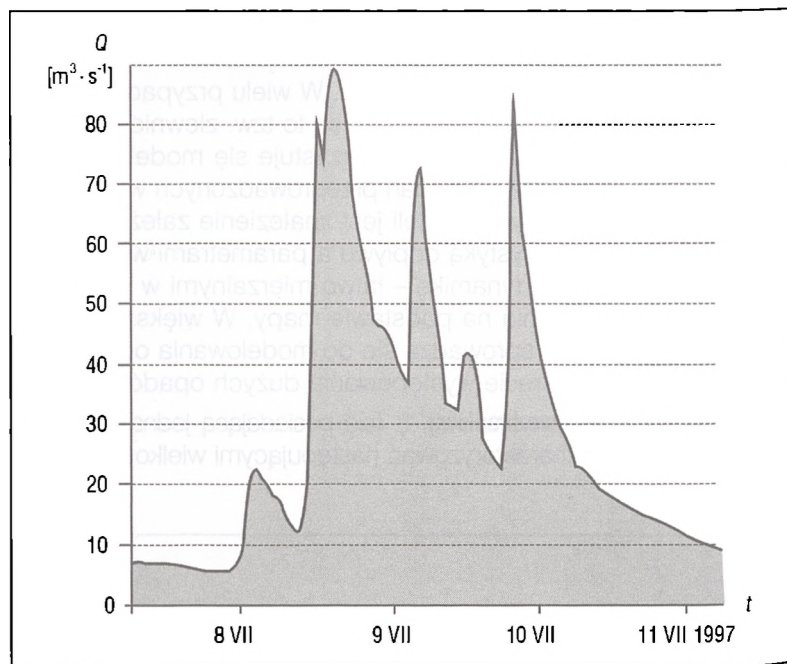
model „białej skrzynki” – model opracowywany przy pełnej informacji o działaniu i wewnętrznej budowie modelowanego systemu; wszystkie procesy są opisane za pomocą równań fizyki matematycznej

Ryc. 4.8.1. Parametry fali wezbraniowej

- czas opóźnienia (czas od momentu pojawienia się opadu do chwili rozpoczęcia przyboru wody w rzece),
- czas wznoszenia fali,
- czas koncentracji fali (od rozpoczęcia opadu do momentu kulminacji),
- czas opadania fali,

- czas trwania fali (podstawa fali wezbraniowej),
- przepływ maksymalny Q_{max} .

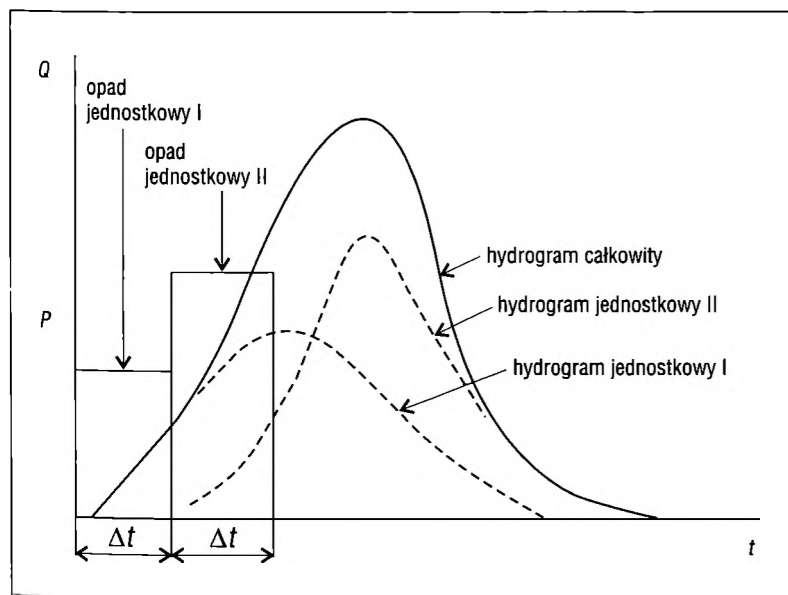
W rzeczywistości, w wielu przypadkach, wezbrania posiadają większą liczbę kulminacji (ryc. 4.8.2). Znacznym postępem



Ryc. 4.8.2. Fala wezbraniowa Nidziczanki (Nidzica) podczas powodzi w lipcu 1997 r.

w rozwoju metod modelowania było wprowadzenie pojęcia **hydrogramu jednostkowego UH** (Unit Hydrograph). Metoda UH została opracowana w 1932 r. przez L.K. Shermana i rozwinięta przez J.E. Nasha. Jej podstawą jest założenie, iż każda zlewnia posiada swój modelowy, charakterystyczny hydrogram odpływu i podstawy fal wywołanych opadami deszczu o tym samym czasie trwania Δt są sobie równe oraz nie zależą od wysokości opadu efektywnego (patrz rozdz. 3.2). W metodzie tej zakłada się, iż podstawowe cechy fizycznogeograficzne zlewni (kształt, wielkość, spadki, struktura sieci rzecznej, gleby; patrz rozdz. 1.2), rządzące formowaniem się odpływu w analizowanym czasie, są w każdej zlewni stałe. Hydrogram jednostkowy rozumiany jest jako rezultat opadu efektywnego o jednostkowym czasie trwania. Ma on kształt zbliżony do trójkąta. Aby wyznaczyć hydrogram całkowity odpływu wywołany przez n kolejnych opadów efektywnych o czasie trwania Δt każdy, stosuje się zasadę superpozycji, polegającą na sumowaniu rzędnych elementarnych hydrogramów jednostkowych. Hydrogram całkowity jest bowiem wypadkową hydrogramów jednostkowych, wywołanych przez kolejne opady efektywne (ryc. 4.8.3).

model „czarnej skrzynki” – model opracowywany przy całkowitym braku informacji o wewnętrznej budowie i działaniu systemu; znane są jedynie zewnętrzne przejawy działania systemu i informacja o systemie uzyskiwana jest tylko na podstawie sygnałów wejściowych i wyjściowych systemu



Ryc. 4.8.3. Opady i hydrogramy jednostkowe oraz hydrogram całkowity

Formowanie się odpływu w zlewni jest uzależnione od natężenia i czasu trwania opadów oraz licznych czynników środowiska geograficznego zlewni. Na podstawie związku pomiędzy parametrami hydrogramu odpływu a ilościowymi charakterystykami geomorfologicznymi zlewni, w latach 70. XX w. I. Rodriguez-Iturbe oraz J.B. Valdes opracowali **geomorfoklimatyczny model transformacji opadu w odpływ (GUH)**. Model bazuje na probabilistycznej teorii dobiegania kropli deszczu z różnych miejsc na obszarze zlewni do profilu zamykającego tę zlewnię. W związku z tym, hydrogram jednostkowy może być wyznaczony jako funkcja gęstości prawdopodobieństwa dobiegania tych kropli wszystkimi możliwymi drogami do przekroju zamykającego zlewnię. Model posiada następujące założenia:

- zlewnia spełnia geomorfologiczne prawa sieci rzecznej, polegające na stałości wskaźników sieci rzecznej (patrz rozdz. 1.2.3),
- znane są funkcje prawdopodobieństwa czasu dobiegu w ciekach różnych rzędów,
- znany jest opad efektywny (patrz rozdz. 3.2).

Aby wyznaczyć geomorfoklimatyczny hydrogram jednostkowy, należy określić następujące parametry:

- **wysokość kulminacji** q_p hydrogramu:

$$q_p = 1,31 R_l^{0,43} \frac{V}{L_0} \quad (4.8.1)$$

gdzie:

q_p – wysokość kulminacji,

model „szarej skrzynki” – model opracowywany na podstawie częściowej znajomości wewnętrznej struktury i działania systemu; podejście pośrednie pomiędzy modelem „białej” i „czarnej” skrzynki

- R_l – wskaźnik długości cieków (patrz rozdz. 1.2.3),
 v – prędkość wody [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$],
 L_0 – długość cieków głównego [km];
 – **czas wystąpienia** kulminacji t_p :

$$t_p = 0,44 \left(\frac{R_b}{R_a} \right)^{0,55} R_l^{-0,38} \frac{L_0}{v} \quad (4.8.2)$$

gdzie:

- R_b – wskaźnik bifurkacji (patrz rozdz. 1.2.3),
 R_a – wskaźnik powierzchni zlewni (patrz rozdz. 1.2.3),
 R_l – wskaźnik długości cieków (patrz rozdz. 1.2.3),
 L_0 – długość cieków głównego [km],
 v – prędkość wody [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$];
 – **czas podstawy hydrogramu** jednostkowego t_b :

$$t_b = \frac{2}{q_p} \quad (4.8.3)$$

Obliczenia wymagają znajomości prędkości wody w profilu zamykającym zlewnię. Zależy ona od intensywności opadu efektywnego, wielkości zlewni oraz parametrów koryta, wyrażonych przez współczynnik fali kinematycznej. Prędkość tę można obliczyć według wzoru:

$$v = 0,665 \alpha_n^{0,6} (0,1 I_i A_n)^{0,4} \quad (4.8.4)$$

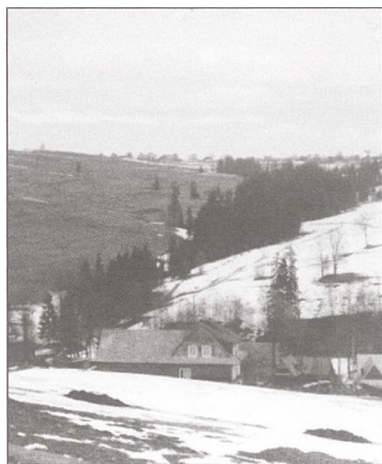
gdzie:

- v – prędkość wody [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$],
 I_i – średnie natężenie opadu efektywnego [$\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$],
 A_n – powierzchnia zlewni najwyższego rzędu [km^2],
 α_n – współczynnik fali kinematycznej wyznaczony za pomocą wzoru:

$$\alpha_n = \frac{S^{\frac{1}{2}}}{nb^{\frac{2}{3}}} \quad (4.8.5)$$

gdzie:

- S – spadek podłużny koryta w obrębie przekroju zamykającego zlewnię,
 n – współczynnik szorstkości Manninga dla koryta najwyższego rzędu (patrz rozdz. 2.4),
 b – szerokość koryta rzecznoego [m] lub – jeśli brak danych pomiarowych – szerokość koryta zastępczego [m], równa iloczynowi $0,8A^{0,7}$, gdzie A oznacza powierzchnię zlewni [km^2].



Aby zastosować geomorfoklimatyczny model odpływu, konieczna jest znajomość parametrów zlewni

Aby otrzymać hydrogramy elementarne, należy pomnożyć rzędne trójkątnego hydrogramu jednostkowego przez wartości opadu. Stosując zasadę superpozycji, uzyskuje się hydrogram odpływu powierzchniowego w jednostkach odpływu [mm]. W celu wyznaczenia natężenia przepływu wykorzystuje się wzór:

$$Q = q \frac{A_n \cdot 10^3}{3600} \quad (4.8.6)$$

gdzie:

- Q – natężenie przepływu [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$],
- A_n – powierzchnia zlewni najwyższego rzędu [km^2],
- q – natężenie odpływu [$\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$].

Geomorfologiczny model odpływu można zastosować do **symulacji hydrogramu odpływu** ze zlewni niekontrolowanych. Zastosowanie tego modelu umożliwi szybką symulację odpływu po wcześniejszym wprowadzeniu do modelu natężenia opadu oraz odpowiednich parametrów geomorfologicznych (powierzchnia zlewni, długość cieków głównego, wskaźniki sieci rzecznej, współczynnik szorstkości Manninga, spadek podłużny koryta w obrębie przekroju zamykającego zlewnię, szerokość koryta rzecznej), a także charakterystyk użytkowania zlewni (jak w metodzie SCS). Na przykład, wprowadzając do modelu planowane zmiany użytkowania zlewni, możliwe jest przewidywanie przebiegu hydrogramu odpływu w nowych warunkach (ryc. 4.8.4).

symulacja – odwzorowanie przebiegu zjawiska za pomocą modelu (np. reakcji zlewni na opad)

Przykład

Wyznacz hydrogram odpływu ze zlewni Starej Rzeki, zakładając, że opad efektywny w trzech kolejnych godzinach wynosił odpowiednio: 0,5 mm, 0,9 mm i 0,6 mm.

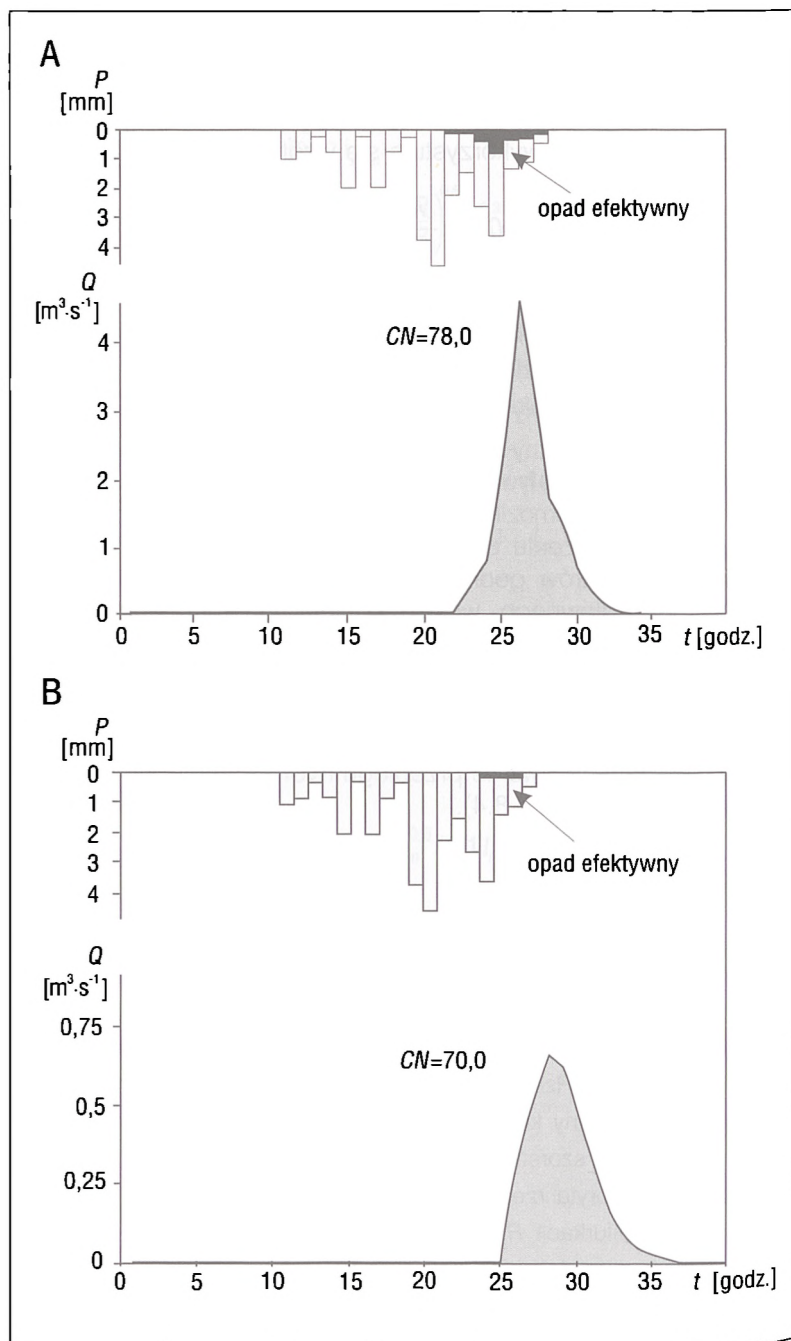
Dane:

- powierzchnia zlewni $A_n = 22,4 \text{ km}^2$
- długość Starej Rzeki $L_o = 10,6 \text{ km}$
- spadek podłużny koryta $S = 0,006$
- współczynnik szorstkości Manninga $n = 0,035$
- szerokość koryta rzecznej $b = 3,5 \text{ m}$
- wskaźnik bifurkacji $R_b = 4,21$
- wskaźnik długości cieków $R_l = 3,18$
- wskaźnik powierzchni zlewni $R_a = 5,91$

Rozwiązanie

1. Obliczenie prędkości wody w profilu zamykającym zlewnię

Aby obliczyć prędkość w profilu zamykającym zlewnię, należy najpierw obliczyć współczynnik fali kinematycznej na podstawie wzoru (4.8.5):



Ryc. 4.8.4. Symulowany geomorfoklimatyczny hydrogram odpływu Starej Rzeki (Pogórze Wiśnickie) przy założeniu użytkowania całej zlewni w postaci gruntów ornych z uprawą rzędowną (A) oraz w przypadku zalesienia całej zlewni (B). (Zwróć uwagę na skalę przepływów)

$$\alpha_n = \frac{0,006^{\frac{1}{2}}}{0,035 \cdot 3,5^{\frac{2}{3}}} = 0,968$$

i następnie prędkość wody w kolejnych godzinach opadu za pomocą wzoru (4.8.4):

$$v_1 = 0,665 \cdot 0,968^{0,6} (0,1 \cdot 0,5 \cdot 22,4)^{0,4} = 0,665 \cdot 0,98 \cdot 1,046 = 0,68 \text{ [m}^3\text{·s}^{-1}\text{]}$$

$$v_2 = 0,665 \cdot 0,968^{0,6} (0,1 \cdot 0,9 \cdot 22,4)^{0,4} = 0,665 \cdot 0,98 \cdot 1,324 = 0,86 \text{ [m}^3\text{·s}^{-1}\text{]}$$

$$v_3 = 0,665 \cdot 0,968^{0,6} (0,1 \cdot 0,6 \cdot 22,4)^{0,4} = 0,665 \cdot 0,98 \cdot 1,126 = 0,73 \text{ [m}^3\text{·s}^{-1}\text{]}$$

2. Obliczenie wysokości kulminacji hydrogramów jednostkowych

Wysokość kulminacji hydrogramów jednostkowych w kolejnych godzinach należy obliczyć według wzoru (4.8.1):

$$q_{p1} = 1,31 \cdot 3,18^{0,43} \cdot \frac{0,68}{10,6} = 0,138$$

$$q_{p2} = 1,31 \cdot 3,18^{0,43} \cdot \frac{0,86}{10,6} = 0,175$$

$$q_{p3} = 1,31 \cdot 3,18^{0,43} \cdot \frac{0,73}{10,6} = 0,148$$

3. Obliczenie czasu wystąpienia kulminacji

Czas wystąpienia kulminacji kolejnych hydrogramów jednostkowych oblicza się według wzoru (4.8.2):

$$t_{p1} = 0,44 \cdot \left(\frac{4,21}{5,91} \right)^{0,55} \cdot 3,18^{-0,38} \cdot \frac{10,6}{0,68} = 3,67$$

$$t_{p2} = 0,44 \cdot \left(\frac{4,21}{5,91} \right)^{0,55} \cdot 3,18^{-0,38} \cdot \frac{10,6}{0,86} = 2,90$$

$$t_{p3} = 0,44 \cdot \left(\frac{4,21}{5,91} \right)^{0,55} \cdot 3,18^{-0,38} \cdot \frac{10,6}{0,73} = 3,42$$

4. Obliczenie podstaw hydrogramów jednostkowych

Aby obliczyć podstawy hydrogramów jednostkowych, należy wykorzystać wzór (4.8.3):

$$t_{b1} = \frac{2}{0,138} = 14,5$$

$$t_{b2} = \frac{2}{0,175} = 11,3$$

$$t_{b3} = \frac{2}{0,148} = 13,5$$

5. Zestawienie tabelaryczne wyników obliczeń

Wygodnie jest zestawzić w tabeli obliczone parametry fal jednostkowych wraz z opadem efektywnym i wielkością odpływu poszczególnych fal jednostkowych. Aby obliczyć wysokość kulminacji fal w jednostkach natężenia przepływu, należy najpierw obliczyć natężenie przepływu w czasie kulminacji. W tym celu mnoży się opad efektywny przez wysokość kulminacji każdej fali (tab. 4.8.1, kolumny 2 i 3) i zestawia w kolumnie 6 (tab. 4.8.1), a następnie stosuje wzór 4.8.6. Na przykład, przepływ kulminacyjny fali jednostkowej, będącej skutkiem opadu efektywnego o wysokości 0,5 mm (pierwsza godzina opadu), wynosi:

Tab. 4.8.1. Parametry fal jednostkowych

Czas [h]	Opad efektywny [mm]	Wysokość kulminacji [h ⁻¹]	Czas wystąpienia kulminacji [godz.]	Podstawa hydrogramu [godz.]	Odpływ w czasie kulminacji [mm · h ⁻¹]	Przepływ w czasie kulminacji [m ³ · s ⁻¹]
1	2	3	4	5	6	7
1	0,5	0,131	3,67	14,5	0,065	0,4070
2	0,9	0,175	2,90	11,3	0,158	0,9799
3	0,6	0,148	3,42	13,5	0,089	0,5525

$$Q = \left(\frac{22,4 \cdot 1000}{3600} \right) \cdot 0,065 = 0,407 \text{ [m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$$

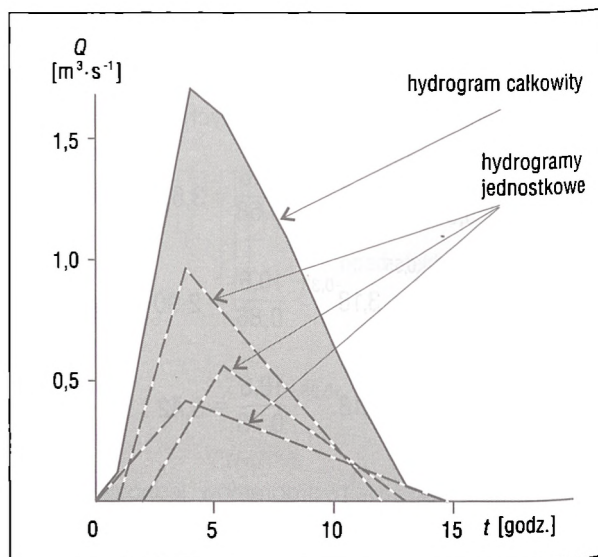
Obliczone przepływy należy zestawzić w tabeli (tab. 4.8.1, kolumna 7).

6. Graficzna prezentacja całkowitego hydrogramu odpływu Starej Rzeki

Aby przedstawić hydrogram całkowity odpływu, należy narysować hydrogramy jednostkowe na podstawie danych w tab. 4.8.1. Hydrogram całkowity wyznacza się stosując zasadę superpozycji (ryc. 4.8.5).

Zadanie

Oblicz objętość fali wezbraniowej Starej Rzeki na podstawie hydrogramu odpływu wyznaczonego w powyższym przykładzie.



Ryc. 4.8.5. Hydrogramy jednostkowe i hydrogram całkowity odpływu Starej Rzeki